

PERSISTENT CURRENT SUPERCONDUCTING MAGNET

Patent Number: JP2000147082
Publication date: 2000-05-26
Inventor(s): HIROSE RYOICHI
Applicant(s):: KOBE STEEL LTD
Requested Patent: ☐ JP2000147082 (JP00147082)
Application Number: JP19980325373 19981116
Priority Number(s):
IPC Classification: G01R33/3815 ; G01R33/389 ; H01F6/00
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a persistent current superconducting magnet which is esp. suited to a high-magnetic field NMR equipment at higher than 500-800 MHz (18.8T), wherein the magnetic field attenuation can be set to less than about 0.01 ppm/hr and the magnetic field is very stable in time in a magnetic field space.

SOLUTION: In this persistent current superconducting magnet device comprising a main magnetic field which generates persistent current superconducting magnet 1 composed of a main magnetic field generating superconducting coil 3 and a persistent current switch 5 connected in parallel to the coil 3, and a main magnetic field attenuation compensating persistent current superconducting magnet 2 composed of a main magnetic field attenuation compensating superconducting coil 4 and a persistent current switch 6 connected in parallel to the coil 4, a magnetic field generated by the attenuation compensating magnet 2 acts on a center magnetic field generated by the main magnetic field generating coil 1, the compensating persistent current superconducting magnet 2 can be energized independently of the main magnetic field generating coil 1 and a very low electric resistance 14 is provided in the circuit thereof.



Data supplied from the esp@cenet database - I2

TOP

W 287

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-147082

(P2000-147082A)

(43) 公開日 平成12年 5月26日 (2000. 5. 26)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	キーワード* (参考)
G 0 1 R 33/3815		G 0 1 N 24/06	5 1 0 C
33/389			5 3 0 Z
H 0 1 F 6/00	Z A A	H 0 1 F 7/22	Z A A A

審査請求 未請求 請求項の数4 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願平10-325373

(22) 出願日 平成10年11月16日 (1998. 11. 16)

(71) 出願人 000001199

株式会社神戸製鋼所

兵庫県神戸市中央区脇浜町1丁目3番18号

(72) 発明者 広瀬 量一

兵庫県神戸市西区高塚台1丁目5番5号

株式会社神戸製鋼所神戸総合技術研究所内

(74) 代理人 100105692

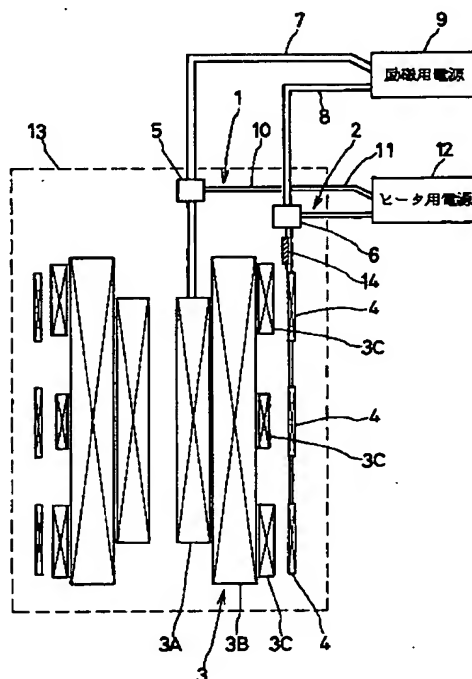
弁理士 明田 莞

(54) 【発明の名称】 永久電流超電導磁石装置

(57) 【要約】

【課題】 磁場の減衰率が0.01ppm/hr程度以下にすることができ、磁場が時間的に且つ磁場空間内で極めて安定した、特に500乃至800MHz (18.8T) 以上の高磁場NMR装置用に適した永久電流超電導磁石装置を提供する。

【解決手段】 主磁場発生用超電導コイル3及びこのコイル3に並列に接続された永久電流スイッチ5とからなる主磁場発生用永久電流超電導磁石1と、主磁場減衰補償用超電導コイル4及びこのコイル4に並列に接続された永久電流スイッチ6からなる主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2とを具備する永久電流超電導磁石装置であって、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の発生する磁場が主磁場発生用永久電流超電導磁石1の発生する中心磁場に作用し、且つ主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2が主磁場発生用永久電流超電導磁石1と独立に通電可能に構成されるとともに、その回路中に微小な電気抵抗14を具備する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 超電導線を巻回した主磁場を発生する超電導コイル及びこのコイルに並列に接続された永久電流スイッチとからなる主磁場発生用永久電流超電導磁石と、超電導線を巻回した主磁場減衰補償用の超電導コイル〔自己インダクタンス $L_s(H)$ 〕及びこのコイルに並列に接続された永久電流スイッチとからなる主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石とを具備する永久電流超電導磁石装置であって、前記主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石の発生する磁場が前記主磁場発生用永久電流超電導磁石の発生する中心磁場に作用し、且つ前記主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石が前記主磁場発生用永久電流超電導磁石と独立に通電可能に構成されるとともに、その回路中に $R_s(\Omega) = (3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-11}) \times L_s$ なる微小な電気抵抗を具備することを特徴とする永久電流超電導磁石装置。

【請求項2】 主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石回路中の微小な電気抵抗が可変抵抗である請求項1に記載の永久電流超電導磁石装置。

【請求項3】 主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石回路中の可変抵抗が、回路中の超電導線又は超電導接続部の環境磁場を変化させて可変抵抗とする請求項2に記載の永久電流超電導磁石装置。

【請求項4】 主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石の超電導コイルが、利用対象とする磁場空間において均一な磁場を形成するように配置されてなる請求項1乃至3の何れか1項に記載の永久電流超電導磁石装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、核磁気共鳴分光分析(NMR)装置用超電導磁石などの永久電流モードで運転される永久電流超電導磁石装置に関する。

【0002】

【従来の技術】一般に、NMR装置用超電導磁石には、NbTi、Nb₃Snなどの超電導線をコイル化したものが用いられている。通常、300～400MHz(9.4テスラ)までの低磁場NMR装置用には、比較的成本の安いNbTi超電導線が用いられ、500乃至800MHz(18.8テスラ)以上の高磁場NMR装置用には、超電導性能が高く、また比較的成本の高いNb₃Sn超電導線が、前記NbTi超電導線と組み合わせて用いられている。

【0003】このようなNMR装置用超電導磁石においては、超電導磁石により発生している磁場が、時間的に且つ磁場空間内で極めて安定であることが要求される。より具体的には、NMR装置の運転中に、磁場の減衰度が0.01ppm/hr程度以下であることが要求される。そのため、通常、超電導磁石装置は永久電流スイッチを具備し、永久電流モードで運転されている。しかし、超電導磁石の超電導線同士の接続部分の微小な接続抵抗が主な原因となって、永久電流が時間の経過とともに徐々に減

衰するため、磁場の減衰が生じる。この接続抵抗値は、通常の半田付けでは $10^{-9}\Omega$ 程度以下にすることは困難であるが、超電導線のフィラメント同士を接続することにより $10^{-12}\Omega$ 程度となる接続技術が開発されている。これにより磁場の減衰率が、前記0.01ppm/hr程度の永久電流超電導磁石が実現している。

【0004】しかし、このような超電導線のフィラメント同士の接続部分の抵抗値は、接続部分の磁場により大きな影響を受け、1テスラ(T)程度以上になると、接続部分の抵抗値が急激に上昇し、使用出来なくなる。特に、NMR装置は、その性能の向上要求から、前記高磁場のものが使用されるようになっていたため、特に、前記高磁場NMR装置などでは、磁場の安定のために、この接続部分に磁気シールドを施すなどの特殊な対策が必要となり、このため構造が複雑となり、コストが高くなるという問題を有する。

【0005】したがって、このような特殊な対策を施すことなく、極めて安定な磁場を得ようとする試みが従来からなされている。例えば、特開平4-61103号公報等では、主磁場減衰補償用の永久電流超電導磁石を設けたNMR装置乃至核磁気共鳴撮像(MRI)装置用永久電流超電導磁石装置が提案されている。この永久電流超電導磁石装置は、図4に示す通り、Nb₃Sn超電導線が巻回された超電導コイル21からなる主磁場を発生する永久電流超電導磁石と、NbTi超電導線が巻回された超電導コイル22からなる主磁場を発生すると共に主磁場の減衰も補償する永久電流超電導磁石とを具備するとともに、その実施例においては更に、主磁場減衰補償用のNbTi超電導線コイル22の外側に、主磁場を発生する永久電流超電導磁石の磁場発生の空間的な不均一性を補うための、NbTi超電導コイル22と直列に接続された、空間磁場の均一度補正用のNbTi超電導コイル23が配置されている。

【0006】そして、前記主磁場を発生するNb₃Sn超電導線が巻回された超電導コイル21は、これに並列に接続された永久電流スイッチ24を有しており、前記主磁場減衰補償用のNbTi超電導線が巻回された超電導コイル22および空間磁場の均一度補正用のNbTi超電導コイル23は、これに並列に接続された永久電流スイッチ25を有している。主磁場を発生するNb₃Sn超電導線が巻回された超電導コイル21と、主磁場減衰補償用のNbTi超電導線が巻回された超電導コイル22とは、各々超電導コイルの励磁用電源26、27と、永久電流スイッチ24、25のヒータ用電源28、29を有し、電気的に独立した関係となっている。そして、両コイル21と22は、磁気的には結合した関係に配置され、前記主磁場を発生するNb₃Sn超電導線が巻回された超電導コイル21の電流減衰により磁石磁場が減衰した際には、主磁場減衰補償用のNbTi超電導線が巻回された超電導コイル22に電流が相互誘導され、この相互誘導された電流による超電導コイル22の磁場の増加によって、前記磁石磁場の減衰を補償し、磁石装置の中心付近

の磁場を極めて安定に保とうとしているものである。

【0007】前記した通り、高磁場NMR装置用の主磁場を発生する永久電流超電導磁石は Nb_3Sn 超電導線コイル(21)と NbTi 超電導線コイル(22)とが直列に接続されて、各々同心円筒状に配置されている。したがって、この特開平4-61103号公報に記載の従来技術は、この高磁場永久電流超電導磁石のうち、既に配置されている NbTi 超電導線コイル(22)の方を、別の励磁用電源27と接続して電氣的に独立させ、かつ磁氣的には結合して配置し、主磁場減衰補償用の超電導コイル22として用いようとするものであると言える。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、この従来のNMR装置乃至MRI装置用永久電流超電導磁石装置では、実際問題として装置の磁場空間全体での均一性を補償することは困難である。その理由の一つは、この装置では、磁場空間の均一度補正用の超電導コイル23が、主磁場減衰補償用の NbTi 超電導線コイル22と直列に接続して設けられていることである。このため、前記主磁場を発生する Nb_3Sn 超電導線超電導コイル21の電流減衰により磁石磁場が減衰し、主磁場減衰補償用の NbTi 超電導線超電導コイル22に電流が相互誘導され、相互誘導された電流による超電導コイル22の磁場が増加する際に、この超電導コイル22と直列に接続された空間磁場の均一度補正用の超電導コイル23も磁場が増加する方向に働く。即ち、主磁場減衰補償用の超電導コイル22の磁場の増加に対し、空間磁場の均一度補正用の超電導コイル23の磁場も増加する。したがって、主磁場減衰補償用の NbTi 超電導線コイル22の電流値のみでなく、空間磁場の均一度補正用の超電導コイル23の電流値も、主磁場を発生する Nb_3Sn 超電導線超電導コイル21との相互誘導により、時間とともに複雑に変化するため、磁場中心の磁場の安定性は確保できても、NMR装置としての磁場空間全体での磁場の均一性を補償することができない。

【0009】このため、NMR装置用永久電流超電導磁石を設計する場合、主磁場減衰補償用の NbTi 超電導線コイル22の設計では、空間磁場の均一度補正用の超電導コイル23と、主磁場を発生する Nb_3Sn 超電導線コイル21との相互誘導も考慮しつつ、前記磁場の空間内での均一度を考慮して設計する必要がある、このような設計は非常に困難がある。この結果、特開平4-61103号公報に記載のNMR装置乃至MRI装置用永久電流超電導磁石装置では、磁場空間全体での均一性や装置のコンパクト化がより要求される、500～800MHz(18.8T)までの高磁場NMR装置用には適用することができない。

【0010】したがって、本発明は、このような従来技術の問題点を鑑み、磁場の減衰率が0.01ppm/hr程度以下にすることができ、磁場が時間的に且つ磁場空間内で極めて安定した、特に500乃至800MHz(18.8T)以上の高磁場NMR装置用に適した永久電流超電導磁石装置を提供

することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】上記の目的を達成するため、本発明に係る永久電流超電導磁石装置は、超電導線を巻回した主磁場を発生する超電導コイル及びこのコイルに並列に接続された永久電流スイッチとからなる主磁場発生用永久電流超電導磁石と、超電導線を巻回した主磁場減衰補償用の超電導コイル〔自己インダクタンス L_s (H)〕及びこのコイルに並列に接続された永久電流スイッチとからなる主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石とを具備する永久電流超電導磁石装置であって、前記主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石の発生する磁場が前記主磁場発生用永久電流超電導磁石の発生する中心磁場に作用し、且つ前記主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石が前記主磁場発生用永久電流超電導磁石と独立に通電可能に構成されるとともに、その回路中に $R_s(\Omega) = (3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-11}) \times L_s$ なる微小な電気抵抗を具備するものである。

【0012】本発明では、主磁場を発生する円筒状の超電導コイルの電流減衰による磁石中心の磁場減衰を、この超電導コイルと独立な主磁場減衰補償用超電導コイルにあらかじめ主磁場を打ち消す磁場を発生させておき、この打ち消す磁場を回路中の微小な電気抵抗により減衰させることにより、主磁場発生用永久電流超電導磁石の減衰による中心磁場の減少分を補償することができる。

【0013】以下、本発明の基本的な概念を、図1に示す本発明に係る永久電流超電導磁石装置の基本的な概念を表す回路図を参照して詳細に説明する。図において、符号1は主磁場を発生する永久電流超電導磁石、2は主磁場減衰補償用の永久電流超電導磁石、3は主磁場を発生する超電導コイル、4は主磁場減衰補償用の超電導コイル、5は主磁場発生用超電導コイル3に並列に接続された永久電流スイッチ、6は主磁場減衰補償用超電導コイル4に並列に接続された永久電流スイッチを示し、主磁場発生用超電導コイル3には配線7により、また主磁場減衰補償用超電導コイル4には配線8により、励磁用電源9がそれぞれ切替可能に接続されている。また、主磁場発生用超電導コイル3に並列に接続された永久電流スイッチ5には配線10により、また主磁場減衰補償用超電導コイル4に並列に接続された永久電流スイッチ6には配線11により、ヒータ用電源12がそれぞれ切替可能に接続されている。また更に、この回路では、主磁場発生用超電導コイル3の自己インダクタンスを L_p 、主磁場減衰補償用超電導コイル4の自己インダクタンスを L_s 、また主磁場発生用超電導コイル3の回路中に含まれる超電導線同士の接続部分などによる微小な接続抵抗のみを R_p 、主磁場減衰補償用超電導コイル4の回路中に含まれる超電導線同士の接続部分などによる微小な接続抵抗 R_s1 と同回路中に人為的に付加される抵抗 R_s2 の和を R_s としてそれぞれ示す。なお、抵抗 R_s について、後述のよう

に $R_{s2} \gg R_{s1}$ であるから、 $R_s = R_{s1} + R_{s2} \approx R_{s2}$ と考えてよい。また、符号13はクライオスタットを示し、励磁用電源9とヒータ用電源12は何れもこのクライオスタット13の外部に設置されている。

【0014】上記図1に示す構成の永久電流超電導磁石の励磁は、主磁場発生用超電導コイル3に並列に接続されている永久電流スイッチ5のヒータにヒータ用電源12より通電し、永久電流スイッチ5を開状態として行う。この状態で、励磁用電源9により主磁場発生用超電導コイル3に電流を流す。主磁場発生用超電導コイル3の電流値が所定の発生磁場 B_0 より ΔB 高い磁場 $(B_0 + \Delta B)$ に相当する電流値 I_0 になれば、ヒータ用電源12をオフとし、永久電流スイッチ5を閉状態とする。 ΔB は、主磁場発生用超電導コイル3の運転期間(例えば10年間)に予想される総磁場減衰量に相当する値とする。例えば予想される磁場減衰率を 0.1 ppm/hr とすれば、10年間の総磁場減衰量は、 $0.1 \times 24 \times 365 \times 10 = 8760$ より約 $0.009 \times B$ になる。すなわち $B_0 \gg \Delta B$ であり、磁場 $(B_0 + \Delta B)$ まで励磁することは、従来のように磁場 B_0 まで励磁することに比べて特に困難さを伴うものではない。

【0015】このようにして励磁した後、主磁場発生用超電導コイル3の電流 I_p は、初期状態では設定電流 I_0 であるが、微小抵抗 R_p があるため時間と共に減衰する。この電流変化は以下の回路方程式により求められる。

$$L_p(dI_p/dt) + R_p I_p = 0 \quad \text{----式1}$$

すなわち、電流は時定数 τ_p で変化し、

$$I_p = I_0 e^a \quad (\text{但し、} a = -t/\tau_p) \quad \text{----式2}$$

$$\tau_p = L_p/R_p \quad \text{----式3}$$

となる。

【0016】ここで、主磁場減衰補償用超電導コイル4にも同様に永久電流スイッチ6のヒータにヒータ用電源12(ただし、主磁場発生用超電導コイル3に用いたものと別のヒータ用電源であってもよい。)より通電し、永久電流スイッチ6を開状態で、励磁用電源9(ただし、主磁場発生用超電導コイル3に用いたものと別の励磁用電源であってもよい。)により電流を流す。主磁場減衰補償用超電導コイル4の電流値が所定の発生磁場 $-\Delta B$ に相当する電流値 I_1 になれば、ヒータ用電源12をオフとし、永久電流スイッチ6を閉状態とする。

【0017】主磁場減衰補償用超電導コイル4の電流 I_s も、同様に初期状態では設定電流 I_1 であるが、微小抵抗 R_s があるため時間と共に減衰する。この電流変化は以下の回路方程式により求められる。

$$L_s(dI_s/dt) + R_s I_s = 0 \quad \text{----式4}$$

すなわち、電流は時定数 τ_s で変化し、

$$I_s = I_1 e^b \quad (\text{但し、} b = -t/\tau_s) \quad \text{----式5}$$

$$\tau_s = L_s/R_s \quad \text{----式6}$$

となる。両コイル3、4を合わせた中心磁場は、

$$(B_0 + \Delta B) e^a - \Delta B e^b \quad \text{----式7}$$

となる。初期状態($t=0$)における中心磁場は B_0 である。

【0018】時刻 t_1 まで中心磁場減衰が生じないためには、下記式8を満足する主磁場減衰補償用超電導コイル4を用いることにより、磁場中心の磁場減衰が全く生じない極めて安定な永久電流超電導磁石装置を提供することができる。

$$(B_0 + \Delta B) e^a - \Delta B e^b = B_0 \quad \text{----式8}$$

$B_0 \gg \Delta B$ であるから、式8は

$$B_0 e^a - \Delta B e^b = B_0 \quad \text{----式9}$$

すなわち、主磁場発生用超電導コイル3の磁場減衰量と、主磁場減衰補償用超電導コイル4の磁場減衰量を等しくすることにより、永久電流超電導磁石装置の磁場の減衰率を 0.01 ppm/hr 程度以下にすることができるなどの目的を達成し得る。実際には、事前に R_p の値を正確に知ることができないため、予想される R_p の値に基づき R_s を設定するか、又は励磁の後 R_s をコントロールし磁場減衰を極小にする操作をすることになる。ここで、 $B_0 \gg \Delta B$ であるから、 $\tau_p \gg \tau_s$ したがって $L_p \gg L_s$ とならないように設計すれば(通常の設計であればこの条件を満たす) $R_p \ll R_s$ であり、 R_p と R_{s1} は同オーダーであることより $R_{s1} \ll R_s$ であるから R_s ($\approx R_{s2}$) の値をコントロールすることは比較的容易である。いずれにしても、式8をほぼ満足することにより、常に磁場減衰が 0.01 ppm/hr 程度以下の極めて安定な永久電流超電導磁石装置を提供することができる。

【0019】実際の主磁場発生用超電導コイル3の総磁場減衰率は $10 \sim 0.01 \text{ ppm/hr}$ と考えられる(これより大きければ、本発明のような付加的な手段で総磁場減衰率を目標値である 0.01 ppm/hr に保つことは困難である。これより小さければ、本発明のような付加的な手段を用いる必要がない)。主磁場減衰補償用超電導コイル4の発生中心磁場 ΔB は現実的には $(10^{-1} \sim 10^{-4}) \times B$ であるから、主磁場発生用超電導コイル3の総磁場減衰量 dB/dt を補償するためには、主磁場減衰補償用超電導コイル4の総磁場減衰量 $\Delta dB/dt$ は、

$$\Delta dB/dt = (10 \sim 0.01) \times 10^{-6} \times B = (10^5 \sim 10^{-1}) \times 10^{-6} \times \Delta B$$

したがって、主磁場減衰補償用超電導コイル4の総磁場減衰率は $10^5 \sim 10^{-1}$ とすればよい。すなわち、

$$R_s/L_s = (10^5 \sim 10^{-1}) \times 10^{-6} / 3600 \approx (3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-11})$$

の範囲で主磁場減衰補償用超電導コイル4の回路 R_s を選択することになる。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基いて説明する。図2は、本発明に係る永久電流超電導磁石装置の断面概要図である。なお、図1と同じ部分については同じ符号を以て示す。

【0021】図2において、主磁場を発生する永久電流超電導磁石1は、 Nb_3Sn 超電導線が巻回された円筒状の主超電導コイル3A、 NbTi 超電導線が巻回された円筒状の

主超電導コイル3B、及びNbTi超電導線が巻回された磁場均一補正用の超電導コイル3Cが直列に接続された主磁場発生用超電導コイル3と、これに並列に接続された永久電流スイッチ5とから構成されている。また、主磁場減衰補償用の永久電流超電導磁石2は、NbTi超電導線が巻回された円筒状の主磁場減衰補償用超電導コイル4と、これに並列に接続された永久電流スイッチ6とから構成されるとともに、主磁場減衰補償用超電導コイル4が主磁場発生用超電導コイル3の外側に配設されている。そして、主磁場減衰補償用超電導コイル4の超電導ループ中には電気抵抗14（抵抗値 R_s ）が設けられている。一方、主磁場発生用超電導コイル3には配線7により、また主磁場減衰補償用超電導コイル4には配線8により、励磁用電源9がそれぞれ切替可能に接続されている。また、主磁場発生用超電導コイル3に並列に接続された永久電流スイッチ5には配線10により、また主磁場減衰補償用超電導コイル4に並列に接続された永久電流スイッチ6には配線11により、ヒータ用電源12がそれぞれ切替可能に接続されている。そして、励磁用電源9とヒータ用電源12を除いては、極低温に保持されたクライオスタット13内に収容されている。

【0022】上記の構成では、主磁場減衰補償用超電導コイル4の超電導ループ中に、主磁場発生用超電導コイル3の微小な接続抵抗値（ R_p ）に基づく抵抗値（電気抵抗14の抵抗値 R_s ）を与えているので、超電導コイル3Cによる磁場均一補正と相まって磁場の均一度を乱すことなく、磁場減衰率が0.01ppm/hr程度以下の極めて安定な磁場を発生することができる。

【0023】

【実施例1】〔実施例1〕上記図2に示す装置を用い、電気抵抗14の抵抗値 R_s の設定と磁場の安定性について以下説明する。用いた装置の詳細な仕様は以下の通りである。主磁場発生用永久電流超電導磁石1の自己インダクタンス L_p は200H、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の自己インダクタンス L_s は10H、それぞれの永久電流超電導磁石1、2の磁場定数 K_p 、 K_s は0.10T/A、0.010T/Aである。主磁場発生用永久電流超電導磁石1は、設定電流141Aで定格磁場14.1Tを発生する。

【0024】まず、ヒータ用電源12により、主磁場発生用永久電流超電導磁石1の永久電流スイッチ5を開状態とし、この状態で励磁用電源9を用いて主磁場発生用永久電流超電導磁石1の励磁を行う。主磁場発生用永久電流超電導磁石1に設定電流141Aより1%高い142.4Aを通電後、ヒータ用電源12をオフとし、磁場14.24Tの永久電流モードに保つ。この状態で、磁場減衰率は仕様の0.01ppm/hrに対し、0.1ppm/hrであった。

【0025】次に、ヒータ用電源12により、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の永久電流スイッチ6を開状態とし、この状態で励磁用電源9を用いて主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の励磁を行う。主磁場減衰

補償用永久電流超電導磁石2に設定電流-14.1Aを通電後、ヒータ用電源12をオフとし、磁場-0.141Tの永久電流モードに保つ。この状態で、中心磁場は定格磁場14.1Tとなる。

【0026】上記の永久電流超電導磁石装置の減衰磁場をほぼゼロにするためには、以下になる。主磁場発生用永久電流超電導磁石1の磁場減衰は、

$$0.1\text{ppm/hr} \times 14.1\text{T} = 1.41 \times 10^{-6}\text{T/hr}$$

である。従って、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2を

$$-1.41 \times 10^{-6}\text{T/hr} / -0.141\text{T} = 10\text{ppm/hr}$$

で減衰させればよい。すなわち、前記した式6（ $\tau_s = L_s/R_s$ ）により、 $10 \times 10^{-6}/3600 = R_s/L_s$

$$L_s = 10\text{H} \text{ であるから、} R_s = 2.8 \times 10^{-8}\Omega$$

とすれば良いことになる。回路中にこの電気抵抗値を与えるには、例えば以下の方法がある。ただし電気抵抗の設定法はこれに限定されるものではない。

【0027】回路を構成する超電導線の抵抗は、ほぼゼロと見なせるので、 $2.8 \times 10^{-8}\Omega$ の抵抗値を電導線の半田接続部で与える。通常の半田（60%Pb-40%Sn）は超電導体であるが、その臨界磁場、臨界電流共に極めて小さいため、磁石の接続部に半田接続を用いた場合、半田は約 $3 \times 10^{-9}\Omega\text{m}$ の抵抗率をもった常電導状態であると考えられる。接続の幅 $b=1\text{mm}$ 、厚み $t=0.1\text{mm}$ とすると、 $R_s = 2.8 \times 10^{-8}\Omega$ の抵抗値を実現するために必要な接続長さ l は

$$R_s = \rho \times t / l \times b$$

より、

$$l = 3 \times 10^{-9} \times 0.1 \times 10^{-3} / (1 \times 10^{-3}) \times 1 / (2.8 \times 10^{-8}) \approx 0.011(\text{m})$$

すなわち、半田接続の長さ l を約11mmとすれば、所定の抵抗値が得られ、磁場減衰をほぼゼロとすることができる。

【0028】実際に、上記図2に示す永久電流超電導磁石装置において、この半田接続の要領で電気抵抗14を設けて中心磁場を1ヶ月以上の長期にわたり測定した結果、磁場減衰率は仕様の0.01ppm/hrを大きく下回る約0.002ppm/hrの極めて安定した磁場を得ることができた。

【0029】〔実施例2〕上記の実施例1では、主磁場発生用永久電流超電導磁石1の磁場減衰率をあらかじめ知った上で主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の回路の抵抗値を定める必要があるが、このためには主磁場発生用永久電流超電導磁石1の磁場減衰率を測定した後分解し、所定の抵抗値を主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の回路に組み込む必要があり工程が煩雑である。これを避けるためには、あらかじめ、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の回路に組み込む電気抵抗14を可変抵抗としておくことが有効である。この場合、上記実施例1と同様に主磁場発生用永久電流超電導磁石

1、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2を励磁し永久電流モードを保つ。この状態で、中心磁場の減衰率が目標とする値以下になるように電気抵抗(可変抵抗)14の抵抗値を調整する。すなわち、目標とする減衰率より大きい場合には抵抗値 R_s を大きく、中心磁場が減衰せず逆に増加する場合には抵抗値 R_s を小さくする。例えば、上記の例で言えば、 $R_s = 2.8 \times 10^{-8} \Omega$ 程度の抵抗値に設定すれば目的を達成し得るもので、この抵抗値を含む範囲の可変抵抗14を設けることで容易に磁場減衰をほぼゼロとすることができる。

【0030】〔実施例3〕図3には、上記実施例2に説明した、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の回路に組み込む可変抵抗の別の一例を示す。一般に接続部15の抵抗値はその接続部15が置かれる磁場に依存する。例えば、実施例1の半田接続では半田の抵抗率が磁場で変化することにより接続部の抵抗値が変化する。簡単のために仮に半田の抵抗率が磁場ゼロで約 $3 \times 10^{-9} \Omega \text{m}$ 、磁場2Tで3倍の約 $9 \times 10^{-9} \Omega \text{m}$ でありこの間線形に変化するとする。接続部15の長さを実施例1の2倍の約22mmとし、図3に示すように、この接続部15を抵抗部磁場可変用コイル16中に配置する。抵抗部磁場可変用コイル16は、主磁場発生用永久電流超電導磁石1、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2と独立に励磁し、抵抗部磁場可変用コイル用永久電流スイッチ17の操作により永久電流モードに保つことができる。

【0031】次に、この状態で、上記実施例1、2と同様に主磁場発生用永久電流超電導磁石1、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2を励磁し永久電流モードに保つ。この状態で、接続部15の磁場はほぼゼロで、その接続部15の抵抗値は実施例1の1/2の $R_s = 1.4 \times 10^{-8} \Omega$ 程度であり、主磁場減衰補償用永久電流超電導磁石2の減衰率は実施例1の1/2の5ppm/hr程度である。この場合、中心磁場の減衰率は約0.05ppm/hrであり、目標とする値0.01ppm/hr以下になっていない。

【0032】ここで、抵抗部磁場可変用コイル用永久電流スイッチ17のヒータにヒータ用電源12(ただし、主磁場発生用超電導コイル3に用いたものと別のヒータ用電源でもよい。)より通電し、永久電流スイッチ17を開状態で、励磁用電源9(ただし、主磁場発生用超電導コイル3に用いたものと別の励磁用電源でもよい。)により抵抗部磁場可変用コイル16に電流を流す。接続部15の磁場が高くなるに伴い接続部15の抵抗値が高くなるため、主磁場減衰補償用超電導コイル4の減衰率が大きくなり中心磁場の減衰率が小さくなる。主磁場減衰補償用超電導コイル4の発生磁場が約1Tになった時、 $R_s = 2.8 \times 10^{-8} \Omega$ 程度になり、中心磁場の減衰率はほぼゼロになる。この状態で、ヒータ用電源12をオフとし、抵抗部磁場可変用コイル用永久電流スイッチ17を閉状態とすることにより、この状態を保つ。このような可変抵抗としても容易に磁場減衰をほぼゼロとすることができる。

【0033】なお、上記実施例においては、図2、3に示すように、主磁場減衰補償用超電導コイル4を軸方向に磁場中心面で対称な3個のコイルに分割配置した例を説明したが、このように2個以上のコイルに分割しそれぞれを適宜配置することにより、主磁場減衰補償用超電導コイル4が磁場中心に発生する磁場分布の z^2 以上の成分を十分小さくすることができる。これにより、高い磁場均一度を要求されるNMR等に用いられる超電導磁石においても、主磁場減衰補償用超電導コイルの磁場減衰による磁場均一度の変化は小さくなるため、磁場の均一性が損なわれることなく、磁場減衰をほぼゼロとすることができる。

【0034】

【発明の効果】以上説明したように、本発明に係る永久電流超電導磁石装置によれば、超電導接続に特殊な技術や対策を施すことなく、極めて高い磁場均一性を長時間安定に維持しつつ、磁場の減衰度が0.01ppm/hr程度以下の極めて安定な磁場を発生させることができる。また、これにより、特に500乃至800Hz(18.8T)以上の高磁場NMR装置用に適した永久電流超電導磁石装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る永久電流超電導磁石装置の基本的な概念を表す回路図である。

【図2】本発明に係る永久電流超電導磁石装置の断面概要図である。

【図3】本発明に係る永久電流超電導磁石装置の別の実施形態の断面概要図である。

【図4】従来の永久電流超電導磁石装置を示す、断面概要図である。

【符号の説明】

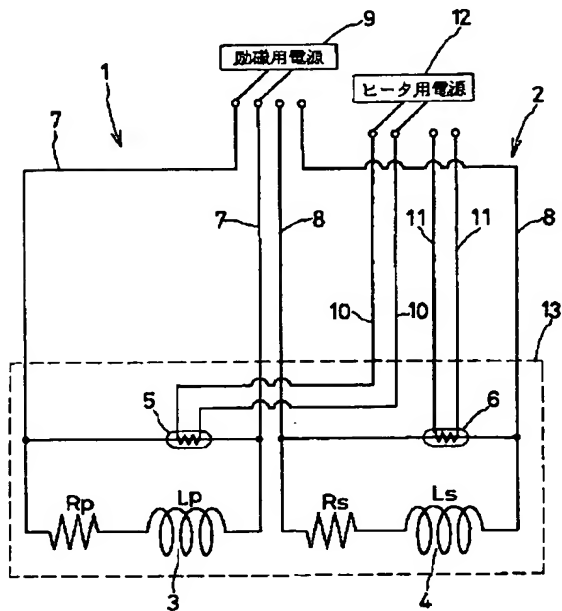
- 1：主磁場発生用永久電流超電導磁石
- 2：主磁場減衰補償用の永久電流超電導磁石
- 3：主磁場発生用超電導コイル
- 3A：Nb₃Sn 超電導線が巻回された円筒状の主超電導コイル
- 3B：NbTi超電導線が巻回された円筒状の主超電導コイル
- 3C：NbTi超電導線が巻回された磁場均一補正用の超電導コイル
- 4：主磁場減衰補償用超電導コイル
- 5, 6：永久電流スイッチ
- 7, 8, 10, 11：配線
- 9：励磁用電源
- 12：ヒータ用電源
- 13：クライオスタット
- 14：電気抵抗
- 15：接続部(抵抗部)
- 16：抵抗部磁場可変用コイル
- 17：抵抗部磁場可変用コイル用永久電流スイッチ
- Lp：主磁場発生用超電導コイルの自己インダクタンス
- Ls：主磁場減衰補償用超電導コイルの自己インダクタンス

ス

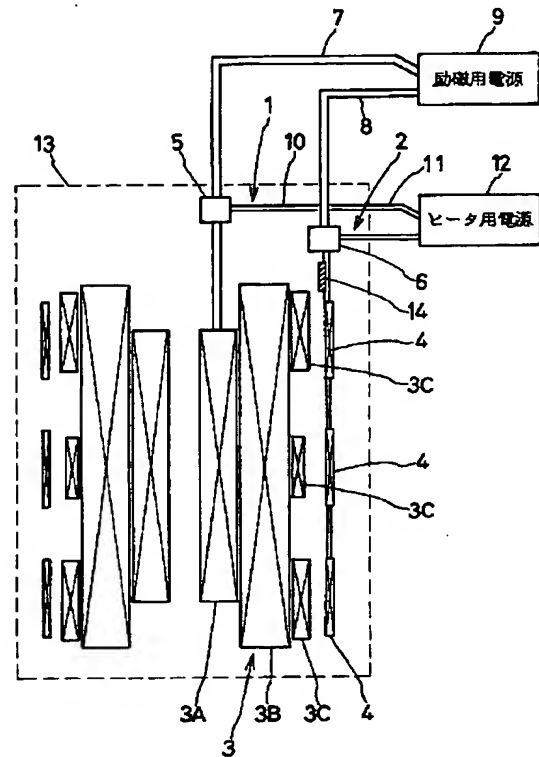
Rp: 主磁場発生用超電導コイルの回路中の微小な接続抵抗
抗

Rs: 主磁場減衰補償用超電導コイルの回路中の接続抵抗
等

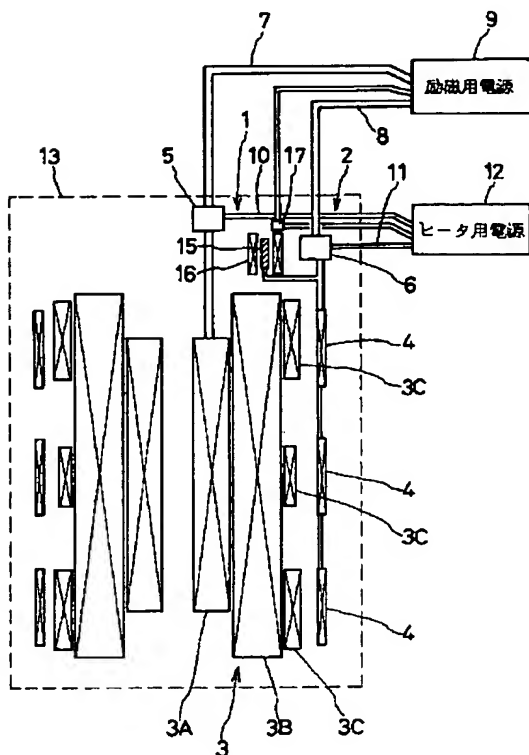
【図1】



【図2】



【図3】



【図4】

